

УДК 537.333

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ В ДИОДЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ПЛАЗМОЙ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

В.П. Григорьев, Е.С. Вагин, В.В. Офицеров

Томский политехнический университет

E-mail: grig@am.tpu.ru

Рассмотрена задача моделирования формирования двойного электрического слоя в диоде, заполненном гелиевой или аргонно-вой плазмой низкой плотности. Дается описание численной модели, разработанной в среде MatLab. Приведены результаты моделирования параметров двойного слоя и напряженности электрического поля на катоде. Определено влияние различных параметров плазмы и ускоряющего напряжения на процесс формирования двойного слоя и распределение потенциала.

Ключевые слова:

Физика плазмы, электронный пучок, двойной слой, плазменный диод, инертные газы, уравнение Пуассона.

Введение

Низкоэнергетические (10...30 кэВ) сильноточные электронные пучки с высокой плотностью энергии находят широкое применение в различных технологических процессах, связанных с изменением состояния и свойств поверхности материалов. Привлекательность низкоэнергетических пучков обусловлена их способностью переносить запасенную энергию без существенных потерь на достаточно большие расстояния и эффективно передавать ее объекту воздействия [1, 2].

Обычно для получения низкоэнергетических пучков используют плазмонаполненные диоды. При этом для осуществления генерации сильноточных пучков необходимо использовать взрывоэмиссионный катод, который работает при напряженностях электрического поля порядка сотен кВ/см. Такого уровня напряженности электрического поля при низких ускоряющих напряжениях достигаются за счет образования двойного плазменного слоя вблизи катода. Поэтому важным является вопрос создания условий возбуждения взрывной электронной эмиссии в зависимости от сорта ионизованного газа, плотности плазмы и приложенного напряжения. Из работ в этом направлении следует отметить [3], где достаточно полно рассматривался вопрос эволюции электрического поля в нестационарном прикатодном слое диода, заполненного углеродной плазмой с однозарядными ионами C^+ либо водородной плазмой с ионами H^+ .

В данной работе исследуется возможность создания условий для взрывной электронной эмиссии при заполнении диода плазмой с однозарядными ионами аргона или гелия. Плазма инертных газов является более предпочтительной при использовании пучков для обработки поверхности материалов, т. к. ее ионы не вступают в химические реакции с поверхностью.

Основные уравнения модели

Рассмотрим плоский диод, заполненный плазмой с однородной плотностью n_0 . Считаем, что напряжение в диоде создается приложением к аноду

положительного потенциала, изменяющегося во времени по закону:

$$U(t) = \begin{cases} U_0(t/\tau_\phi) & \text{при } 0 < t < \tau_\phi, \\ U_0 & \text{при } t > \tau_\phi. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь U_0 — амплитуда приложенного потенциала, τ_ϕ — длительность фронта импульса.

При включении импульсного напряжения в таких системах вблизи катода возникает двойной плазменный слой, параметры которого изменяются во времени. Основные особенности изменения параметров двойного слоя на этом этапе освещены в работе [4].

Для сильноточных диодов за счет проникновения электрического поля в плазму происходит ускорение плазменных электронов и ионов, которые движутся в противоположных направлениях. Ионы достаточно быстро уходят к катоду и в результате плотность плазмы вблизи катода понижается. Под действием перепада давления возникает адиабатический поток ионов, который и формирует профиль плотности плазмы на переднем фронте проникновения поля. При этом одновременно происходит перераспределение потенциала в диоде. Все электрическое поле концентрируется в прикатодном двойном слое, размеры которого значительно меньше диодного промежутка. Результатом этого является резкое повышение напряженности электрического поля на катоде (обычно выше 100 кВ/см), достаточное для возбуждения электронной взрывной эмиссии с катода.

Математическая модель, в одномерном приближении, описывающая процесс формирования двойного слоя в прикатодной области и допускающая расчет напряженности электрического поля на катоде представляет собой систему:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(n_i V) &= 0, \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} &= \frac{e}{M} \frac{\partial \phi}{\partial x}, \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} &= -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i(x, t) - n_e(x, t)). \end{aligned} \quad (2)$$

Полагая функцию распределения электронов по скоростям максвелловской, для определения плотности электронов используем следующее выражение

$$n_e(x, t) = n_0 \exp\left(-\frac{e\varphi(x, t)}{T_e}\right), \quad (3)$$

где $n_i(x, t)$, $n_e(x, t)$, см⁻³ – плотности ионов и электронов соответственно, $V(x, t)$, см/с – скорость ионов, $\varphi(x, t)$, В – потенциал, формируемый в двойном слое, e – элементарный заряд, M – масса иона, T_e – температура электронов плазмы в эВ, ε_0 – электрическая постоянная.

Граничные условия записываются по координате x в области диодного промежутка $0 < x < l$, где l – координата анода, а начальные условия записываются в границах численного счета по времени $0 < t < T$ и имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned} n_i(l, t) = n_e(l, t) = n_0, \quad V(l, t) = V(x, 0) = V_0, \\ \varphi(0, t) = 0, \quad \varphi(l, t) = U(t). \end{aligned} \quad (4)$$

При решении данной задачи удобно использовать разностные методы. В основе этих методов лежит

сведение дифференциальной задачи к системе линейных алгебраических уравнений. При этом система уравнений (2) в разностях преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} n_{ik}^{n+1} &= n_{ik}^n - V_{ik}^n \frac{\tau}{2h} [n_{ik+1}^n - n_{ik-1}^n], \\ V_i^{n+1} &= \frac{V_{k+1}^n + V_{k-1}^n}{2} + \tau \left[\frac{e}{M} \frac{\varphi_{k+1}^n - \varphi_{k-1}^n}{2h} - V_k^n \frac{V_{k+1}^n - V_{k-1}^n}{2h} \right], \\ \varphi_{k+1}^{n+1} - 2\varphi_k^{n+1} + \varphi_{k-1}^{n+1} &= -h^2 \frac{e}{\varepsilon_0} (n_{ik}^n - n_{ek}^n), \end{aligned} \quad (5)$$

на сетке:

$$\omega_{ht} = \{(x_k, t_n); \quad k = 1, 2, \dots, K-1; \quad n = 0, 1, \dots, N-1\}.$$

Моделирование и анализ результатов

Моделирование формирования двойного слоя проводится путем численного решения системы конечно-разностных уравнений (5). Алгоритм решения реализован в среде MatLab.

В расчетах параметры плазмы выбирались близкими к экспериментальным по генерации сильноточных пучков в плазменнополненных диодах [1]. А именно,

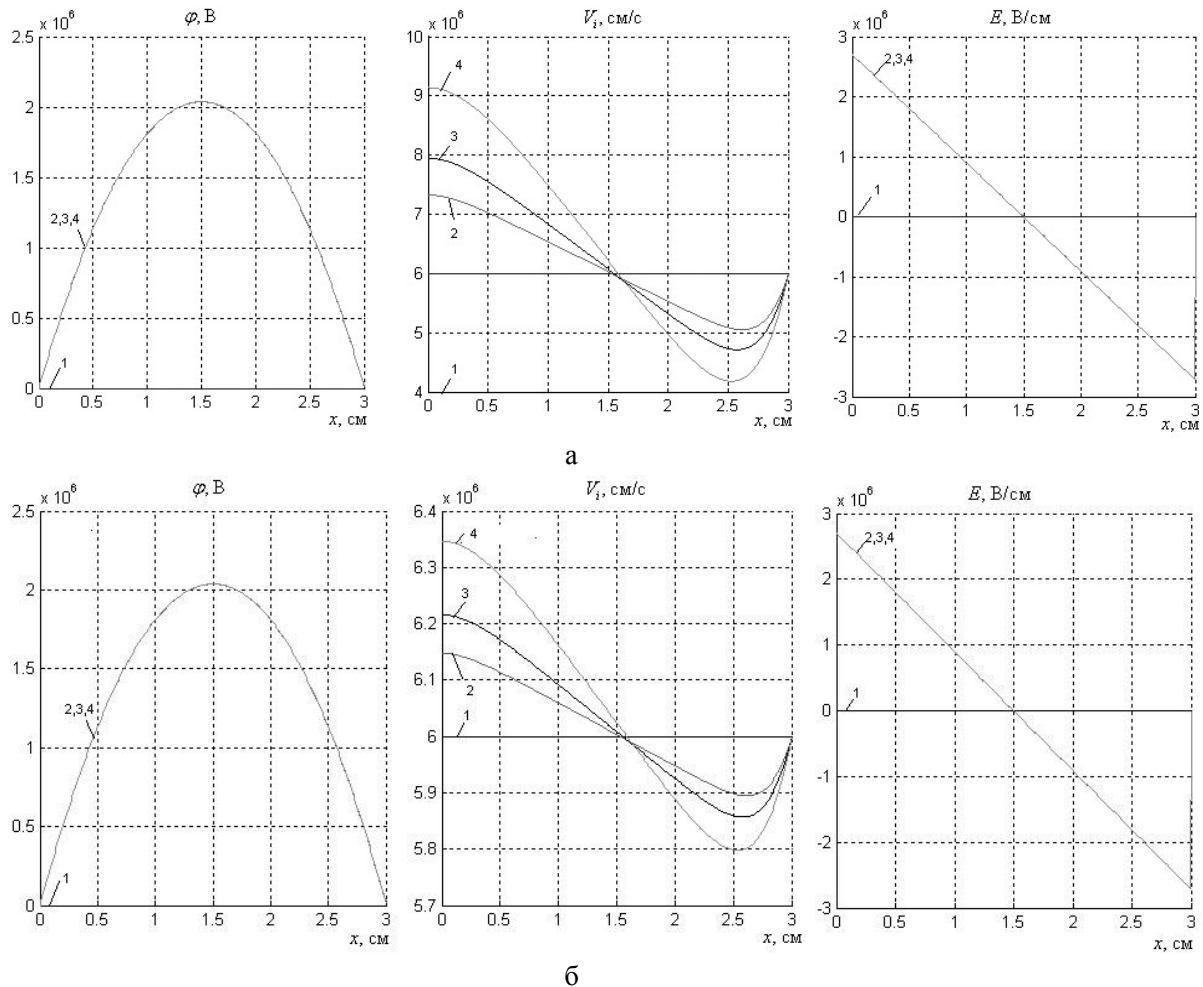


Рисунок. Распределение потенциала φ , скорости V_i и напряженности поля E в моменты времени: 1) $t=0$; 2) 12; 3) 18; 4) 30 нс для газов: гелий (а), аргон (б)

ускоряющее напряжение $U_0=10^4$ В, начальная скорость ионов $V_0=6 \cdot 10^6$ см/с, температура электронов $T_e=2$ эВ, плотность ионов $n_0=10^{11} \dots 10^{13}$ см $^{-3}$, диодный промежуток $l=1 \dots 3$ см, длительность импульса $\tau=30$ нс.

Таблица. Основные параметры численных расчетов и значения φ_{\max} , E_{\max} , V_{\max}

Газ	n_0 , см $^{-3}$	l , см	τ , нс	φ_{\max} , 10^5 , В	E_{\max} , 10^6 , В/см	V_{\max} , 10^6 , см/с
He	10^{11}	1,0	6	0,3	0,1	6,1
Ar	10^{12}	1,0	6	2,5	1,0	7,2
Ar	10^{13}	1,0	6	25,0	10,0	20,0
Ar	10^{11}	1,0	6	0,3	0,1	6,0
Ar	10^{12}	1,0	6	2,5	1,0	6,1
Ar	10^{13}	1,0	6	25,0	10,0	7,3
He	10^{12}	1,0	15	2,5	1,0	6,7
Ar	10^{12}	1,0	15	2,5	1,0	6,1
He	10^{12}	1,5	15	5,1	1,5	7,3
Ar	10^{12}	1,5	15	5,1	1,5	6,2
He	10^{12}	3,0	15	21,0	3,0	9,1
Ar	10^{12}	3,0	15	21,0	3,0	6,4

Распределение потенциала и величина напряженности электрического поля на катоде рассчитывались при различных значениях этих параметров, при этом принималось, что диодный промежуток заполнен аргоновой либо гелиевой плазмой с однозарядными ионами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Генерация низкоэнергетических сильноточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом // Известия вузов. Физика. – 1994. – Т. 37. – № 3. – С. 100–114.
2. Григорьев В.П., Коваль Т.В., Кухта В.Р., Рахарджо П., Умура К. Исследование транспортировки и фокусировки низкоэнергетического электронного пучка в ионизованном аргоне низкого давления // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – № 1. – С. 104–108.
3. Крейндель М.Ю., Литвинов Е.А., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Нестационарные процессы в начальной стадии формирования сильноточного электронного пучка в плазмонаполненном диоде // Физика плазмы. – 1991. – Т. 17. – № 12. – С. 1425–1431.
4. Иваненков Г.В. Двойные слои в сильноточном плазменном диоде // Физика плазмы. – 1982. – Т. 8. – № 6. – С. 1184–1191.

Поступила 14.04.2008 г.